

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Трофимов Б.Я., Шудяков К.В.

**ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)», г. Челябинск**

В настоящее время и на ближайшую перспективу бетон и железобетон является основным строительным материалом, мировой объём производства и применения которого достиг более 20 млрд тонн в год. При строительстве жилых, гражданских, промышленных зданий и инженерных сооружений в мире происходит переход на сборный или сборно-монолитный бетон, что вызвано следующими причинами:

- Повышением производительности труда за счёт механизации и автоматизации производственных процессов,
- Стационарное производство легче обеспечивает стабильность высокого качества продукции через организацию пооперационного контроля, исключение ручного труда,
- Суровые климатические условия большинства регионов РФ также определяют приоритетную роль строительства с применением сборного железобетона.
- Современные полимеры, применяемые для изготовления форм, позволяют разнообразить виды изделий и варианты их отделки,
- Применение водоредуцирующих добавок позволяет отказаться от вибрирования бетонной смеси, тепловой обработки, повысить плотность, прочность и долговечность строительных конструкций,
- Конструкция форм, переналадка их с помощью манипуляторов позволяют получать изделия с минимальными допусками, оптимизировать выпуск комплекта изделий с минимальным числом переналадок и при максимальном использовании формовочной площади форм-паллет.
- Режим твердения бетона и обеспечение его стабильного высокого качества зависит от стабильности свойств использованных материалов, при использовании которых снижается объём контроля и переналадок технологии.
- Применение цементов с минеральными добавками, особенно эффективных в условиях тепловлажностного твердения железобетонных конструкций, позволяет успешно решать технические, экономические и экологические проблемы.

Зарубежные предприятия по производству сборного железобетона работают в автоматическом или полуавтоматическом режиме с использованием программного управления роботов и манипуляторов. Использование современных технологий и оборудования зарубежными фирмами по производству изделий из железобетона обеспечивает

- Низкую себестоимость продукции благодаря высокой производительности труда,

- Гарантированно высокую однородность изделий по механическим характеристикам бетона и изделий в целом.

Это обеспечивает широкий рынок сбыта и конкурентоспособность железобетонных изделий.

Для внедрения автоматизации и роботизации на заводах жби за рубежом выполняются следующие условия:

- строгое постоянство поставщиков и параметров качества сырьевых компонентов,
- стабилизированные режимы технологических операций,
- программное управление технологическим процессом,
- автоматически переналаживаемое оборудование, формы для изменяющейся номенклатуры изделий,
- автоматизированный входной, операционный и выходной контроль.

Такое высокоэффективное оборудование закуплено и рядом отечественных предприятий, выпускающих сборный железобетон (рис.1).



Рис.1. Оборудование современных отечественных заводов железобетонных изделий

Что характерно для отечественных предприятий в том числе и оснащённых современной техникой?

1. Применение небогащённых заполнителей переменного качества и влажности,
2. Не всегда отслеживается наличие вредных примесей в заполнителях,
3. Частая смена поставщиков материалов с целью снижения затрат на производство,
4. Большой объём выборочного контроля качества материалов и изделий,
5. Необходимость частой корректировки составов бетона и режимов технологических операций.

Несмотря на большой объём контроля, качество продукции отличается от лучших мировых образцов в худшую сторону по показателям прочности бетона и характеристикам однородности этого показателя, а также по категории качества поверхности изделий. Это связано с тем, что качество материала оценено по усреднённой пробе, а в каждом замесе есть различные отклонения

от этих усреднённых значений. Изменение грансостава материалов, загрязняющих пылеватых и глинистых примесей в заполнителях, изменение нормальной густоты цемента, применение тонкодисперсных добавок влияют на водопотребность бетонной смеси и на показатели её удобоукладываемости. Приготовленную смесь уже поздно корректировать по удобоукладываемости, значит нужно менять режимы формования и уплотнения смеси. Всё это делается на глазок, в спешке, желании не останавливать производства. Отсюда могут быть изделия, бетонная смесь в которых имеет разную степень уплотнения, и, следовательно, с разной плотностью, прочностью и стойкостью бетона. Такая практика использования неоднородных материалов затрудняет или полностью исключает работу технологического оборудования в автоматическом режиме. Следовательно, страдает не только качество, но и производительность, себестоимость изделий.

По ГОСТ 27006-86 при подборе состава бетона следует провести длительную процедуру расчета, корректировки и выдачи готовой рецептуры бетона для производства бетонной смеси. Корректировка рабочего состава или назначение нового состава бетона должны производиться по результатам входного, технологического или приёмочного контроля в соответствии с рис. 2.



Рис.2 Условия назначения нового состава или корректировки рабочего состава бетона.

Выполнение этих требований ещё больше затрудняет возможность обеспечения бесперебойной работы предприятия, повышает объём контроля и корректировок, а, главное, не гарантирует повышение качества железобетонных изделий и однородности бетона по прочности и другим характеристикам.

На заводах жби, как правило, выбирают наихудшее сочетание неблагоприятных факторов и для него рассчитывают и корректируют состав бетона. При этом получают наибольший расход цемента, отсюда повышенные усадка и экзотермия бетона, повышенная ползучесть. Все добавки также дозируются в % от массы цемента, поэтому получаем повышенный расход добавок. Следовательно, эти мероприятия не исключают неоднородность бетона по механическим свойствам, и при этом приводят к повышению себестоимости железобетона, то есть ухудшают его эффективность.

Единственным способом обеспечения постоянно высокого качества и однородности бетона в изделиях является тщательная подготовка заполнителей: выявление наличия вредных примесей и предотвращение их попадания в заполнители, удаление загрязняющих примесей путём промывки, сушка и рассев заполнителей по фракциям, для различной наибольшей крупности приготовление смеси фракций заполнителей, содержащей соответствующий фракции в соответствии с кривой Фулера-Боломея. Цемент нужно покупать у такого поставщика, который обеспечивает высокие показатели однородности свойств цемента в соответствии с требованием ГОСТ 30515-2013.

Таким образом, основным направлением повышения эффективности сборного железобетона следует считать то, что отмечено в решении 3-й всероссийской конференции по бетону и железобетону: использование для производства бетона мытых, фракционированных заполнителей широкой номенклатуры. Для этого нужно создавать предприятия для производства такого заполнителя. В этом плане работают заводы сухих строительных смесей, в которых применяются чистые, фракционированные заполнители постоянного качества. Это позволит снизить расход цемента, использовать современные технологии: самоуплотняющиеся бетонные смеси, высокопрочные и быстротвердеющие бетоны и др.

Замена части цемента активной минеральной добавкой не только снижает стоимость вяжущего, но и повышает эксплуатационные свойства бетона на нём. Одной из наиболее распространённых активных минеральных добавок является доменный гранулированный шлак (ДГШ), состав и свойства которого достаточно стабильны для конкретного металлургического завода. Особенности структуры цементного камня при твердении цемента с добавкой ДГШ, заключается в формировании повышенного количества модифицированного цементного геля, обеспечивающего высокую плотность и стойкость бетона.

Доменный гранулированный шлак является одним из основных компонентов при производстве портландцементов, шлакопортландцементов, композиционных цементов и шлакоцементов. Содержание шлака в таких цементах может достигать 80% и более. За последние 20 лет стремительно изменилась структура выпускаемых в мире цементов – доля в % ЦЕМ 1 уменьшилась более чем в 2 раза, а доля ЦЕМ 2 увеличилась более чем в 4 раза, возрастает доля цементов с минеральными добавками ЦЕМ 3 (рис.3):

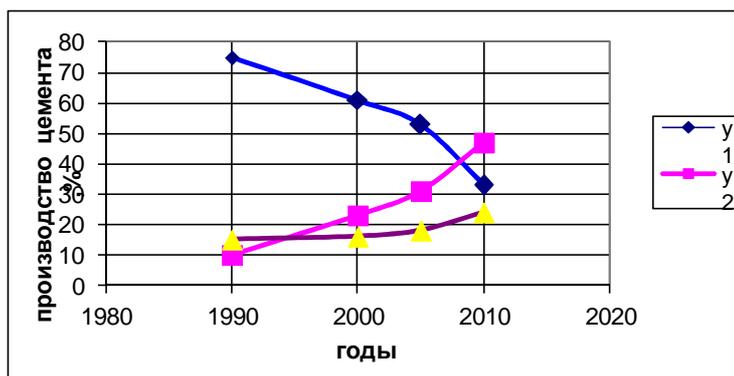


Рис. 3 Изменение доли мирового производства различных видов цемента; у1 – ЦЕМ 1, у2 – ЦЕМ 2, у3 – ЦЕМ 3.

Применение цемента с ДГШ позволяет решить некоторые социальные проблемы: утилизировать отходы, сократить объёмы производства клинкера, что, в свою очередь, сокращает энергоёмкость производства цемента и выбросы углекислого газа в атмосферу, снижает стоимость бетона и железобетона. Введение ДГШ в состава цемента приводит к следующим изменениям свойств вяжущего по сравнению с ЦЕМ 1 [1]:

- Повышает водопотребность с увеличением дисперсности шлака, удлиняет сроки начала и конца схватывания, что способствует увеличению сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси.

- Замедляет набор прочности цемента в ранние сроки при естественном твердении.

- Уменьшает теплоту гидратации, поэтому такие цементы рекомендуются при строительстве массивных сооружений, но для зимних условий твердения или для изготовления сборного железобетона на таких цементах желательнее применение прогревных методов твердения.

- Повышается стойкость цементного камня к воздействию агрессивных сред: сульфатостойкость, кислотостойкость, щёлочестойкость, стойкость к морской воде, карбонизации и др. вследствие уменьшения в цементном камне $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и продуктов гидратации алюминатных фаз.

- За счет снижения объёма капиллярных пор и увеличения содержания низкоосновных гидросиликатов кальция типа С-S-H (1) бетоны на таких цементах при сопоставимой степени гидратации вяжущего характеризуются повышенной морозостойкостью, водостойкостью и водонепроницаемостью.

- Железобетонные изделия на смешанных вяжущих менее склонны к высолообразованию вследствие меньшего содержания свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне и повышенной плотности.

Применение шлакопортландцементов при производстве сборного и монолитного железобетона с использованием прогревных способов ускорения твердения бетона позволяет добиваться наибольшей экономии топливно-энергетических ресурсов, в связи с чем доля производства таких цементов в некоторых странах составляет 40...65 % при содержании шлака до 80...90 %.

Для расширения области применения бетонов на шлакопортландцементных необходимо выяснить возможность применения таких бетонов для изделий с нормируемыми требованиями по морозостойкости. Замедление гидратации и твердения бетонов на шлакопортландцементных особенно характерное в ранние сроки твердения, приводит к тому, что в марочном возрасте, когда обычно испытывают морозостойкость, бетоны на таких цементах характеризуются повышенной открытой капиллярной пористостью из-за меньшего (по сравнению с бетонами на портландцементных) объёма продуктов гидратации цемента. Кроме того, уменьшение объёма гелевой структурной составляющей цементного камня снижает роль адсорбционной контракции, увеличивает

проницаемость и степень насыщения бетона водой, что снижает его морозостойкость. Шлакопортландцементный камень нормального твердения с высоким (более 70 %) содержанием шлака характеризуется повышенной пористостью и низкой прочностью, так как в нём преобладают негидратированные зёрна шлака, покрытые тонким слоем гидросиликатного геля.

Для получения сопоставимых с бетоном на портландцементе данных по морозостойкости необходимо обеспечить одинаковую степень гидратации цементов, то есть одинаковую степень заполнения первоначальных капиллярных объёмов продуктами гидратации. Технологически повышение плотности бетонов на шлакопортландцементе достигается либо увеличением гидравлической активности шлаков, либо уменьшением объёма капиллярных пор снижением количества воды затворения (используя водоредуцирующие добавки или жесткие бетонные смеси и интенсивные способы её уплотнения при формировании изделий и конструкций).

По данным [2] микроструктура камня из шлакопортландцементного вяжущего аналогична микроструктуре камня из чистого портландцемента за исключением меньшего содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Слои продуктов гидратации клинкерных фаз образуются на границах шлаковых зёрен и постепенно распространяются вширь. В возрасте 90 суток их ширина составляет 0,5 мкм, через 6 месяцев – 10 мкм, через 14 месяцев – 15 мкм. В более позднем возрасте в камне преобладают полностью гидратированные остатки частиц шлака. Формирующиеся низкоосновные гидросиликаты кальция типа C-S-H имеют значения отношения Ca/Si в интервале 1,55-1,79, что ниже, чем значения этого отношения 1,7-2,0, характерные для чистого портландцемента. Продукты гидратации шлака содержат значительно меньше CaO и больше алюминия и магния. Предполагается, что гидрат, описанный как C-S-H, в действительности представляет собой однородную смесь последнего с AFm-фазой и, в меньшей степени, со структурой гидротальцитового типа, имеющей отношение $\text{Al}/\text{Mg}=0,38$. В ходе гидратации шлака имеет место небольшое перемещение ионов магния или кислорода внутрь или наружу шлаковой матрицы. При этом высвобождается значительная часть ионов алюминия, кремния и кальция и забирается эквивалентное количество водорода. Освобождённые ионы вносят вклад в состав продуктов гидратации, образующихся в первоначально наполненном водой пространстве. Содержание связанной воды в двухлетнем камне из теста с $\text{В}/\text{T}=0,5$ обычно уменьшается с 0,23% для чистого портландцементного камня, до 10-13% для смешанных цементов, содержащих 90% шлака.

Кристаллические фазы более разбросаны в шлакопортландцементном камне, чем эттрингит портландцемента, локализованный вокруг зёрен C_3A . Глинозём, содержащийся в шлаковом стекле, встречается в гидратированном камне в виде твёрдого раствора в гидросиликатном геле. При повышенном содержании шлака в результате твердения шлакопортландцемента образуется камень, в котором уменьшается содержание свободного гидроксида кальция, взаимодействующего со шлаковым стеклом.

Гидросиликатный гель со временем постепенно уплотняется за счёт поглощения извести, что приводит к росту плотности и прочности цементного камня. Из-за меньшего содержания извести в шлакопортландцементном камне этот процесс идёт медленнее, чем для портландцементного камня.

При использовании особенно малоалюминатного шлака, шлакопортландцемент при гидратации образует более плотную гидросиликатную гелевую структуру с меньшим содержанием кристаллической извести по сравнению с портландцементным камнем. Эти особенности структуры шлакопортландцементного камня обуславливают его высокие прочностные и эксплуатационные свойства. Тепловлажностная обработка является благоприятным режимом твердения шлакопортландцемента, при котором, благодаря активизации шлака, образуется дополнительное количество продуктов гидратации, повышается плотность гелевидной структурной составляющей типа C-S-H (1), формируется мелкодисперсная структура цементного камня. Связывание извести шлаком в гелевидные гидросиликаты обеспечивает их высокую стабильность и придаёт бетону способность релаксировать напряжения при фазовых переходах поровой жидкости в процессе замораживания. Применение шлакопортландцементов с предварительно тонко измельчённым шлаком повышает трещиностойкость бетона при нормальном твердении за счёт уменьшения концентрации напряжений при увеличении количества гелевидных гидросиликатов кальция. Это создаёт предпосылки для получения бетона на шлакопортландцементе высокой морозостойкости и, что особенно важно, прошедшего тепловлажностную обработку, которая снижает морозостойкость бетона на портландцементе примерно в два раза, по сравнению с образцами бетона нормального твердения.

Из практики известно, что наивысшую морозостойкость бетона удаётся получить при использовании сульфатостойкого портландцемента. Пуццолановые добавки, связывающие известь и повышающие стабильность цементного геля, вводимые в больших количествах (до 30...40 % по массе), понижают морозостойкость бетона из-за резкого увеличения водопотребности такого вяжущего. Небольшая добавка природной пуццоланы (до 5 % от массы цемента) повышает морозостойкость бетона благодаря образованию дополнительного количества гидросиликатного геля, уплотняющего бетон.

Следовательно, проблема повышения морозостойкости бетона с применением шлакопортландцементов сводится с одной стороны к увеличению гидравлической активности шлаков (тонкий помол, грануляция для получения шлака с минимальным содержанием кристаллической фазы, термическое, сульфатное, щелочное или комплексное возбуждение), а с другой – к регулированию пористости бетона.

Исходя из этих представлений о способах создания бетонов высокой морозостойкости можно наметить следующие направления регулирования пористости (рис. 4): формирование структуры цементного камня с повышенным содержанием гшелеобразных продуктов гидратации,

уменьшенным содержанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$, при минимальной макрокапиллярной пористости.

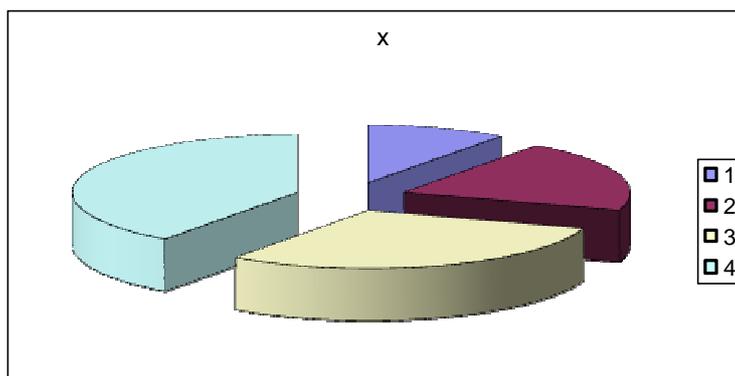


Рис 2. Факторы морозостойкости: 1 – открытая пористость, 2 – воздухововлечение, 3 – структура, 4 – цементный гель.

Основные технологические приёмы повышения морозостойкости бетона в настоящее время сводятся главным образом к одному из способов регулирования пористости. Наиболее широко применяется уменьшение количества воды затворения (В/Ц), приводящее при постоянной степени уплотнения бетонной смеси и степени гидратации цемента к понижению открытой капиллярной пористости. Понижение водопотребности бетонной смеси достигается также использованием цемента с минимальной водопотребностью, применением чистых фракционированных заполнителей, обеспечивающих оптимальный зерновой состав их смеси и минимальный расход цемента, формование изделий из жёстких бетонных смесей или с водоредуцирующими добавками и др. Предельно допустимая капиллярная пористость бетона требуемой морозостойкости зависит от вида используемого цемента (рис.5). Сульфатостойкий белитовый цемент с пониженным содержанием C_3S и C_3A при твердении создаёт тонкодисперсную структуру с повышенной релаксационной способностью, что позволяет получать требуемую морозостойкость бетона при большем объёме капиллярных пор. При одинаковой капиллярной пористости морозостойкость может изменяться в 2...3 раза – таково влияние структурных особенностей цементного камня, которые можно формировать введением активных минеральных и поверхностно-активных добавок, способствующих получению коллоидно-дисперсной структуры цементного камня.

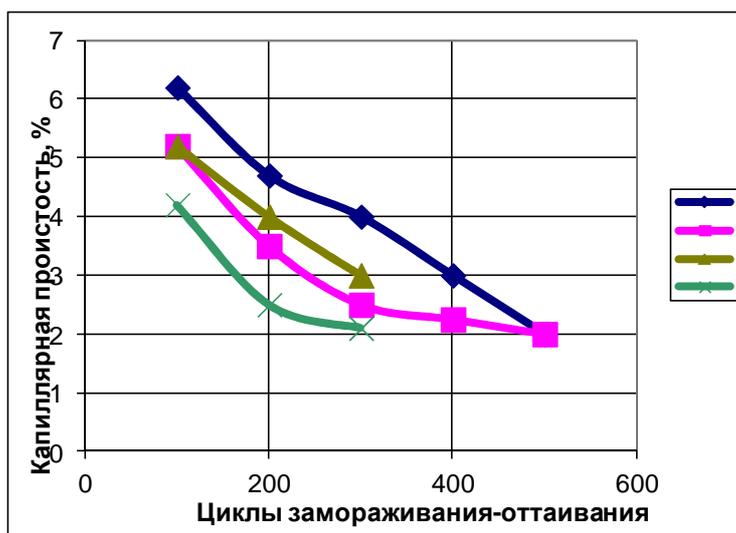


Рис.5 Капиллярная пористость тяжелого бетона различной морозостойкости по [3]. 1,2 – на сульфатостойком портландцементе, 3,4 – на быстротвердеющем портландцементе, 1,3 – воздушно-влажное твердение, 2,4 – тепловлажностная обработка

Для оценки влияния вида цемента на морозостойкость бетона были проведены исследования, при этом использовались следующие материалы:

- песок кварцевый Бобровского карьера с модулем крупности 2,11, плотностью $2,62 \text{ г/см}^3$, насыпной плотностью $1,58 \text{ г/см}^3$, пустотностью около 40 %, с содержанием зёрен гравия более 10 мм 2,8 %, от 5 мм до 10 мм – 3,75 %, содержание частиц мельче 0,14 мм – 2,9 %, отмучиваемых примесей 2,5 %, водопотребность – 8,4 %;

- гранодиоритовый щебень Новосмолинского карьера составлялся из фракций 3...10 мм и 10...20 мм в соотношении 2 : 3, обеспечивающем максимальную насыпную плотность смеси фракций, плотность зёрен щебня $2,66 \text{ г/см}^3$, насыпная плотность 1460 кг/м^3 , пустотность 43 %, водопоглощение 2,56 %, отмучиваемых примесей 1,1 %.

- Цементы Коркинского цементного завода с одинаковым химическим и минералогическим составами клинкерной и шлаковой составляющих (табл. 1), но с разным их соотношением, что приводит к различию свойств (табл. 2).

Таблица 1
Химический состав клинкера и шлака*

Наименование	Содержание в % по массе												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	FeO	CaO _{св}	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	ппп
Клинкер	21,04	5,81	4,74	65,81	1,94	0,31	0,04	0,34	-	-	-	-	0,25
Граншлак ЧМЗ	38,64	11,66	2,20	34,75	10,28	0,56	-	0,30	0,97	0,48	0,32	0,56	-

Расчетный минералогический состав клинкера: C₃S – 57 %, C₂S – 20 %, C₃A – 8 %, C₄AF – 15 %.

* По данным заводских лабораторий.

Таблица 2
Основные свойства цементов

Вид цемента	Содержание граншлака, %	Нормальная гкстота, %	Остаток на сите 008, %	Сроки схватывания		Активность при про- парке, МПа	Прочность, МПа			
				Начало час- мин	Конец час- мин		Изгиб		Сжатие	
							3 сут	28 сут	3 сут	28 сут
Портландцемент М 400	20	24,75	10,0	3-10	4-03	27,5	4,15	6,40	24,2	44,8
Шлакопортландцемент М 400	36	24,87	8,0	3-45	4-42	25,6	3,15	6,10	14,7	42,3
Шлакопортландцемент М300	49	25,12	8,0	3-50	5-15	21,2	2-96	4,80	10,2	29,0

Сравнение результатов испытания образцов на различных цементах при благоприятных режимах твердения показывает, что непосредственно после пропарки прочность при сжатии бетона на ШПЦ 300 ниже, чем на других вяжущих (рис.6). Удлиненные режимы пропаривания при максимальной температуре 368 К позволяют получать наибольшие приросты прочности в процессе тепловлажностной обработки бетона на ШПЦ 300. Прочность бетона на ШПЦ 400 и ПЦ 400 незначительно отличается при различных В/Ц, хотя преимущества бетона на ПЦ 400 более ощутимо при коротких режимах пропаривания.

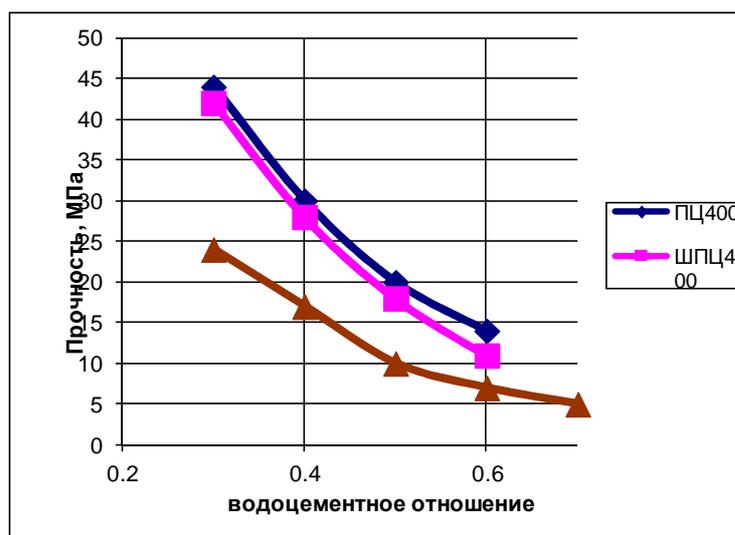


Рис. 6 Прочность при сжатии бетона после пропарки

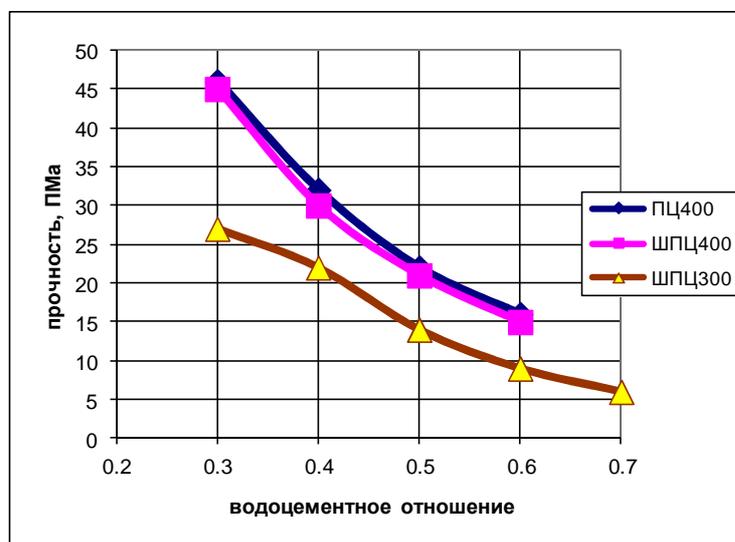


Рис. 7 Прочность при сжатии бетона через 7 суток после пропарки

Через 7 суток после пропарки (рис. 7) прочность бетона на ШПЦ 400 и ПЦ 400 мало отличаются, а на ШПЦ 300 остаётся меньше, хотя разница существенно снижается по сравнению с образцами, испытанными сразу после пропарки. Так, если сразу после пропарки разница в прочности бетона на ШПЦ 300 и ПЦ 400 составила 6...7 МПа при высоких значениях В/Ц (0,5...0,6), а при низких (0,35...0,45) достигала 17...19 МПа, то через 7 суток после пропаривания разница соответственно была 3...4 МПа и 8...10 МПа. Набор прочности после пропаривания образцами бетона на ШПЦ 300 протекает более

интенсивно, чем на других вяжущих и к 28 суткам после пропаривания она выше (рис.8), чем у образцов, твердевших в нормальных условиях. Для образцов на ШПЦ 400 и ПЦ 400 прочность пропаренного бетона через 28 суток, как правило, ниже, чем прочность нормально твердевших образцов и только для низкотемпературных режимов пропарки она может превосходить прочность нормально твердевших образцов бетона. Нужно отметить, что к 28 суткам значительно уменьшается влияние режима тепловой обработки бетона на его прочность.

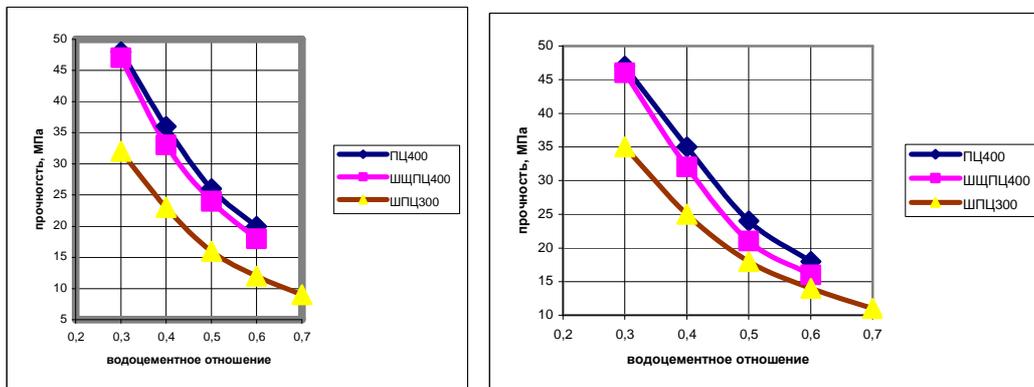


Рис.8 Прочность бетона при сжатии через 28 суток твердения. Левый график – образцы нормального твердения, правый – после тепловлажностной обработки

Максимальное значение прочности бетона на осевое растяжение при раскалывании через 7 суток после тепловлажностной отмечается для образцов бетона на ШПЦ 400, тогда как для образцов, изготовленных на ШПЦ 300 и ПЦ 400 она отличается незначительно при близких значениях В/Ц.

На рис. 9 приводится сопоставление прочности при изгибе образцов бетона на исследуемых вяжущих через 7 суток после пропарки, прослеживается тенденция к увеличению этой прочности с ростом количества шлака в цементе, что отмечено и в других исследованиях [4]. Повышенное содержание кристаллической структурной составляющей цементного камня, характерное для образцов бетона на ПЦ 400, приводит к снижению трещиностойкости за счёт большой концентрации напряжения при изгибе.

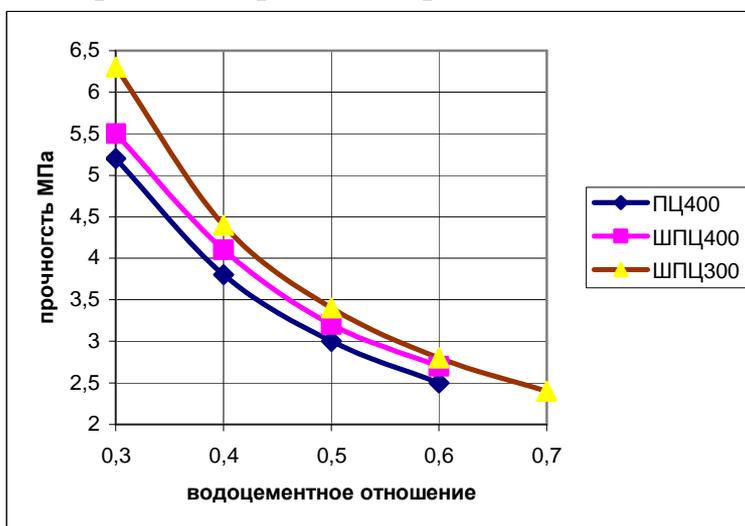


Рис. 9 Прочность бетона при изгибе через 7 суток после пропарки

Для испытания морозостойкости нами изготавливались без применения воздухововлекающих добавок образцы бетона на портландцементе ПЦ 400 Д-20 с 19% доменного гранулированного шлака и шлакопортландцементе ШПЦ 300 с 48 % доменного шлака при В/Ц 0,389 и соотношении твёрдых составляющих 1:1,56:2,61 по массе, расход цемента принимался постоянным – 450 кг на 1 м³ бетонной смеси. Образцы-кубы с ребром 100 мм формовались на стандартной виброплощадке и твердели 24 суток в воздушно-влажных условиях при +20±2°С сразу после изготовления или 3 суток в этих условиях после пропаривания по режиму 2+4+8+3 с температурой изотермической выдержки 85°С для образцов на портландцементе и 95°С – на шлакопортландцементе. Перед циклическим замораживанием образцы насыщались 4 суток водой, контрольные образцы хранились в камере нормального твердения и испытывались одновременно с циклически замораживаемыми в водонасыщенном состоянии.

Циклическое замораживание проводилось при минус 50°С в воде в течение 8 часов с последующим оттаиванием 8 часов в воде с температурой +20°С. Изменение прочностных свойств образцов бетона приведено на рис. 10.

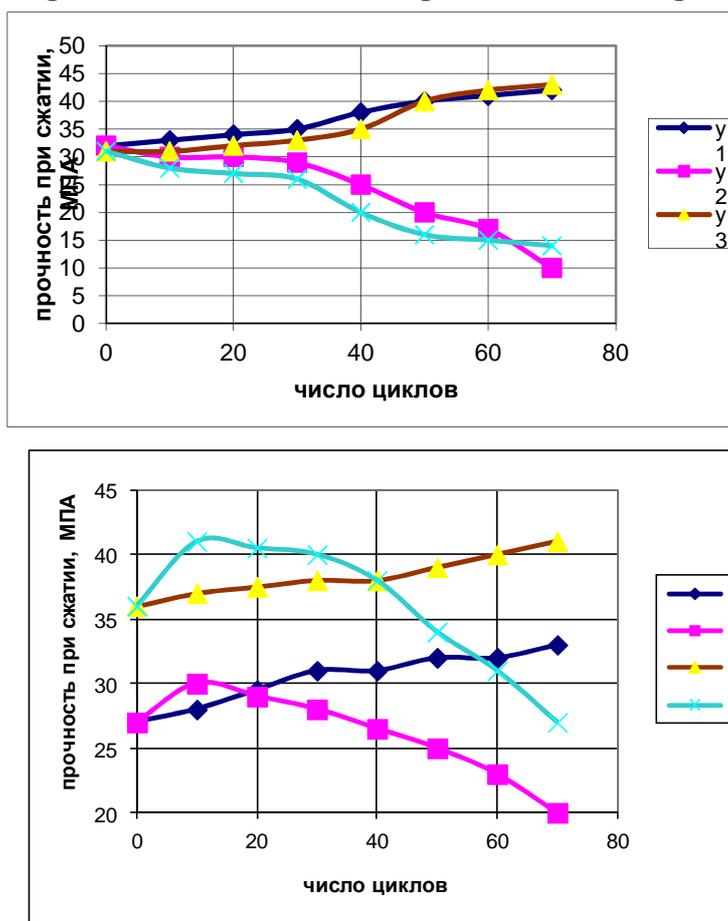


Рис. 10 Прочность бетона при В/Ц 0,389 после различного числа циклических замораживаний до минус 50°С

Верхний график - образцы бетона на портландцементе ПЦ 400 Д-20, Нижний – образцы на ШПЦ 300,

у1, у2 – нормально твердевшие до испытания образцы;

у3, у4 – пропаренные;

у1, у3 – контрольные образцы,

у2, у4 – изменение прочности циклически замораживаемых образцов.

Циклическое замораживание при минус 50°С на воздухе с последующим оттаиванием в воде показало, что морозостойкость образцов бетона зависит от вида цемента.. Для бетона на шлакопортландцементе прочность замораживаемых пропаренных образцов превышает прочность контрольных до 35 циклов, а нормально твердевших образцов это превышение наблюдается более 20 циклов.

Бетон на портландцементе показал, что уже после 10 циклов замораживания и оттаивания прочность и пропаренных и нормально твердевших образцов ниже, чем прочность контрольных.

Исходя из представлений о влиянии циклического замораживания на гидратационные процессы вяжущего можно считать, что при испытании морозостойкости при минус 50°С происходит первоначально увеличение проницаемости гидратных оболочек на поверхности негидратированных клинкерных остатков. Вода проникает к цементным реликтам и возбуждается процесс гидратации с образованием дополнительного количества гидратов, повышающих первоначальную плотность и прочность бетона. Можно предположить, что проходящее на первых циклах более интенсивно «самозалечивание» возмещает убыль прочности из-за разрушения целостности гидратных оболочек.

В пользу такого механизма прироста прочности бетона в начальный период испытания морозостойкости свидетельствуют данные изменения прочности бетона при изгибе. Ни в одном случае не отмечено возрастание прочности бетона при изгибе замораживаемых образцов по сравнению с первоначальной прочностью или прочностью контрольных образцов. Микроповреждения приводят к снижению прочности при изгибе и образованию дополнительного количества продуктов гидратации не полностью восстанавливает разрушенные связи. Вероятно, рвутся более хрупкие кристаллические связи, а восстанавливаются главным образом коагуляционно-конденсационные связи.

Проведённые испытания показывают, что бетон особенно после тепловлажностной обработки на шлакопортландцементе сопротивляется низкотемпературному циклическому замораживанию лучше, чем бетон на портландцементе. Пропаренные образцы на вяжущем с повышенной добавкой шлака показывают большую морозостойкость, чем образцы нормального твердения.

На рис. 11 приводятся значения льдистости бетона, определённой при минус 20°С дилатометрическим способом. При одинаковой степени водонасыщения льдистость бетона на шлакопортландцементе ниже, чем на портландцементе. Увеличение количества незамерзающей воды в бетоне вызвано увеличением объёма гелевой пористости цементного камня.

Зависимость морозостойкости бетона от его льдистости при первом замораживании приведена на рис. 12. Льдистость бетона является комплексной характеристикой пористости, характеризующей объём макрокапилляров, в которых вода переходит в лёд при заданной температуре. В реальных условиях эксплуатации определение льдистости позволяет учесть влияние на морозостойкость и температуры замораживания, и степени водонасыщения бетона, а следовательно приблизить оценку морозостойкости бетона к реальным условиям эксплуатации, и, что очень важно, значительно ускорить определение морозостойкости. Низкое значение показателя льдистости бетона при водонасыщении под вакуумом является следствием большого объёма гелевых пор, в которых вода не замерзает и обладает способностью к адсорбционной контракции при охлаждении, снижая степень заполнения макрокапилляров замерзающей водой. Зная зависимость температуры замерзания от размера капилляра [5] можно с помощью показателя льдистости, определённого при различной температуре замораживания образцов, оценивать дифференциальную пористость бетона при размере пор менее 10 нм.

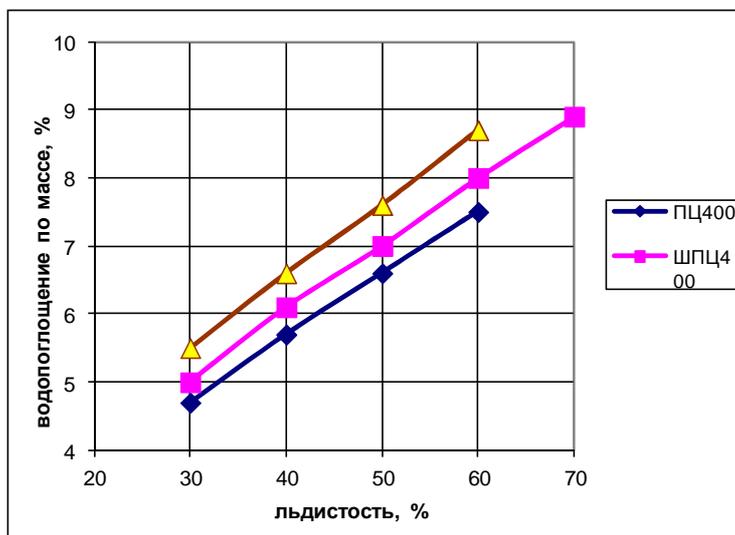


Рис. 11 Льдистость бетона при минус 200С

Аппроксимирующая функция зависимости морозостойкости бетона от показателя льдистости, полученная нами ранее [6], достаточно точно описывает экспериментальные значения морозостойкости бетона на портландцементе и шлакопортландцементе – средняя квадратичная погрешность составляет 21,8 цикла.

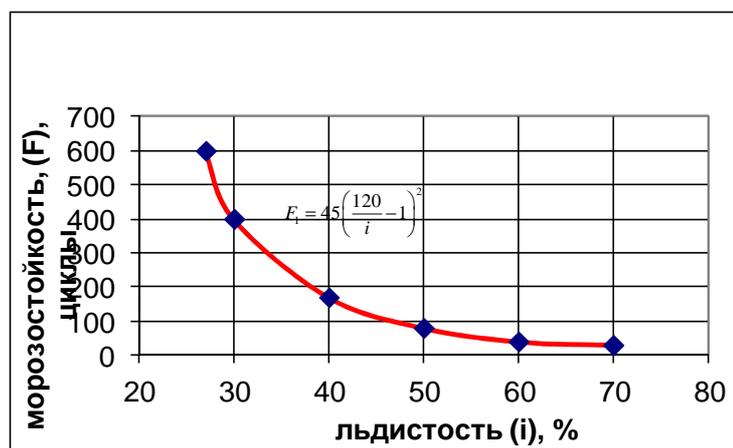


Рис. 12 Зависимость морозостойкости бетона от льдистости

При одинаковой льдистости пропаренные образцы бетона на шлакопортландцементе М300 характеризуются, как правило, более высокой морозостойкостью. Следовательно, помимо характеристик пористости бетона на его морозостойкость оказывают влияние особенности структуры продуктов гидратации, их деформативность, способность релаксировать напряжение и сохранять эту способность длительное время при циклических воздействиях.

Выводы

1. Для повышения эффективности производства сборного железобетона до современного уровня необходимо переходить на высококачественные материалы с гарантированными показателями однородности

2. Существенно повышается эффективность сборного железобетона при переходе на шлакопортландцемент, что способствует повышению морозостойкости бетона в том числе и при низких отрицательных температурах.

3. Оптимальное содержание доменного гранулированного шлака в цементе для изделий из бетона повышенной морозостойкости составляет 48-50% от массы цемента.

Список литературы

1. Гергичны, З. Европейский опыт успешного использования в строительстве цементов с добавкой доменного шлака. – *ALITinform, международное аналитическое обозрение ЦЕМЕНТ. БЕТОН. СУХИЕ СМЕСИ*, №4-5, 2013.- с.36-41.

2. Тейлор, Х. Химия цемента. Перевод с английского / Х.Тейлор.– М: Мир, 1996. –560 с.

3. Состав, структура и свойства цементных бетонов./Г.И.Горчаков, Л.П.Орентлихер, В.И.Савин и др.–М.:Стройиздат, 1970.–144 с.

4. Зацепин, А.Н. Шлакопортландцемент для бетонных покрытий дорог и аэродромов / А.Н. Зацепин, С.А. Машковская – *Цемент*, №6, 1958.– с.20-23.

5. Бакаев, В.А. *Понижение температуры плавления воды в капиллярах пористого тела* / В.А. Бакаев, В.Ф. Киселёв, К.Г. Красильников.—ДАН СССР, т.125, №4, 1959.—с.831-835.

6. *Методические указания по ускоренному испытанию бетона на морозостойкость/в лабораториях Главюжуралстроя/.*—Челябинск, 1980.—20с.